

INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE FIBRAS E DE CINZAS VOLANTES, PARA DIFERENTES IDADES, NO COMPORTAMENTO EM FLEXÃO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

José Amorim⁽¹⁾, J.A.O. Barros⁽²⁾ e Joaquim Antunes⁽³⁾

⁽¹⁾ Aluno de Mestrado de Eng^a Civil - Universidade do Minho

⁽²⁾ Professor Auxiliar; Dep. de Eng^a Civil - Universidade do Minho

⁽³⁾ Investigador; Dep. de Eng^a Civil - Universidade do Minho



Resumo: Recentemente foram propostas recomendações no sentido de normalizar os procedimentos associados ao ensaio de flexão que permite determinar a capacidade de absorção de energia do Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA), tendo sido sugerida a utilização de parâmetros para simular o comportamento à tracção deste compósito fendilhado, nas verificações aos estados limites de utilização e últimos. Neste trabalho descrevem-se os ensaios efectuados, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, principalmente a influência, na resistência equivalente em flexão, da percentagem de fibras, da quantidade de cinzas volantes e da idade do compósito.

1 - INTRODUÇÃO

A capacidade de absorção de energia é a propriedade mais beneficiada pela adição de fibras a materiais de matriz cimentícia [Barros 1995]. Por este facto, diversas metodologias de ensaio de flexão têm sido propostas no sentido de quantificar o acréscimo de ductilidade que se observa quando se adiciona fibras ao betão [Balaguru e Shah 1992, ACI 1997]. As diferentes abordagens do problema, desde as dimensões do provete, condições de carregamento, processo de aquisição de dados, até às características do equipamento têm conduzido ao surgimento de vários parâmetros relacionados com a capacidade de absorção de energia do compósito, mas de difícil relação entre eles. Contudo, quer o controlo de qualidade do BRFA aplicado quer o dimensionamento de estruturas constituídas por este material exigem a

normalização dos ensaios e o estabelecimento de parâmetros únicos indicadores da ductilidade acrescida introduzida no betão por determinado tipo e percentagem de fibras.

Neste sentido, a RILEM [2000a] propôs recentemente uma metodologia de ensaio de flexão para o BRFA, assim como parâmetros que pretendem caracterizar a ductilidade deste material. Foram propostos dois parâmetros, designados de resistência equivalente dois e três ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$), ambos a serem utilizados na simulação do comportamento à tracção do BRFA fendilhado, o primeiro nas verificações aos estados limites de utilização e o segundo nas verificações aos estados limites últimos.

O presente trabalho insere-se num projecto de investigação cujos objectivos fundamentais são o desenvolvimento e

caracterização experimental de BRFA de custo competitivo, com resistência e condições de trabalhabilidade adequadas a pavimentos de edifícios industriais. Assim, na concepção dos BRFA desenvolvidos teve-se em conta as seguintes condicionantes:

- resistência característica à compressão superior a 25 MPa aos 28 dias;
- quantidade de ligante, C^* (cimento, C, + cinzas volantes, CV) igual a 300 kg/m³;
- abaixamento superior a 15 cm;
- utilização de materiais disponíveis na região Norte do País.

A campanha de ensaios efectuados no âmbito deste trabalho teve como principal objectivo analisar a influência em $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ da percentagem de fibras, da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes e da idade do BRFA à data do ensaio.

2 - ENSAIO DE FLEXÃO SEGUNDO O RILEM

2.1 - Introdução

Com este ensaio, a RILEM pretende normalizar toda a envolvente associada à caracterização do comportamento em flexão do BRFA, desde as características do provete até às especificidades do equipamento de ensaio e de aquisição de resultados, vindo mesmo a propor determinados conceitos que podem ser utilizados nos modelos de dimensionamento de estruturas de BRFA [RILEM 2000b].

Com base na resposta força-flecha obtida neste ensaio avaliam-se o limite de proporcionalidade (LOP) e dois parâmetros, designados de resistência equivalente em flexão, que pretendem caracterizar o comportamento do material até determinada flecha. Podem-se ainda traçar a relação entre a abertura de fenda (CMOD - Crack Mouth Opening Displacement) e a flecha e a relação entre a tensão e a abertura de fenda, esta última de primordial importância na calibração de modelos de simulação numérica do comportamento do

BRFA, baseados na mecânica da fractura [Olesen, 2001].

As características do provete, processo de enchimento, condições de cura, procedimentos de ensaio e características do equipamento estão devidamente descritos em outro trabalho dos autores [Barros *et al.* 2001].

2.2 - Resultados a extrair

Na Figura 1 representa-se o carregamento, condições de apoio e sistema de registo da deformabilidade do provete. A fotografia da Figura 2 e o esquema da Figura 3 ilustram o sistema de ensaio de flexão de acordo com as recomendações da RILEM.

Relações típicas que se obtêm no ensaio de flexão estão representadas na Figura 4. Na Figura 4b, F_u é a carga correspondente ao LOP, que consiste na máxima força registada até uma deformação δ_p , obtida traçando-se por $\delta = 0.05$ mm uma paralela ao ramo linear. O δ_p é o deslocamento de intercepção desse ramo com a curva obtida nos ensaios experimentais.

A capacidade de absorção de energia $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) é igual à área sob a curva carga-flecha até à flecha de δ_2 (δ_3), e é constituída por duas partes, uma correspondente à contribuição do betão simples:

$$D_{BZ}^b \text{ [N.mm]}$$

e outra à das fibras:

$$\begin{aligned} D_{BZ,2}^f &= D_{BZ,2,I}^f + D_{BZ,2,II}^f \text{ [N.mm]} \\ D_{BZ,3}^f &= D_{BZ,3,I}^f + D_{BZ,3,II}^f \end{aligned} \quad (1)$$

Admitindo uma distribuição linear de tensões na secção de fractura (plano de simetria da viga), a resistência equivalente à tracção em flexão $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ pode ser determinada por meio das seguintes expressões [Barros *et al.* 2001]:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,2,I}^f}{0.65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \text{ [N.mm}^2\text{]}$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,3,I}^f}{2.65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2}$$

(2)

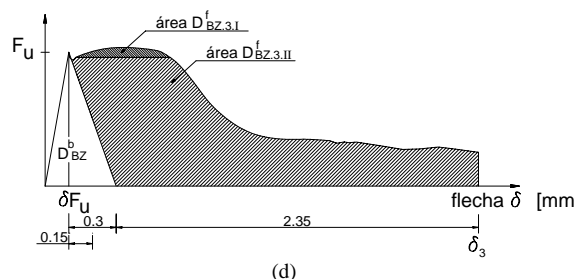
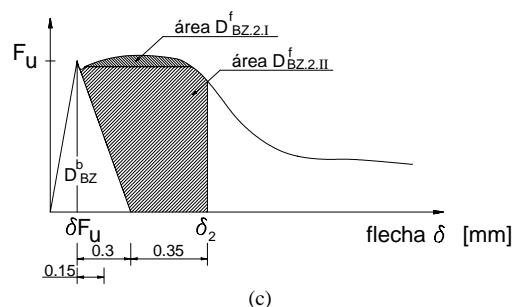
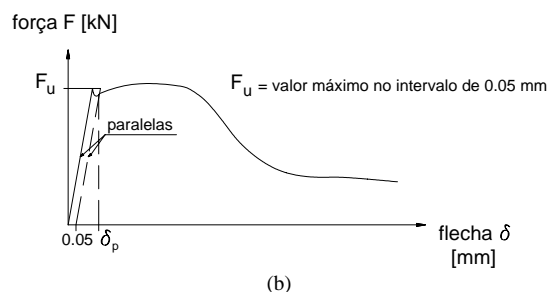
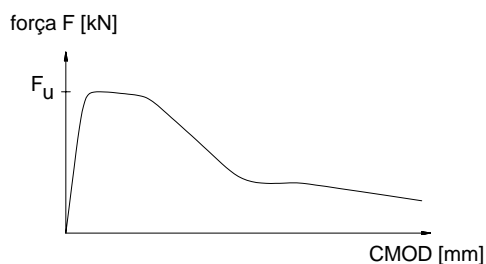
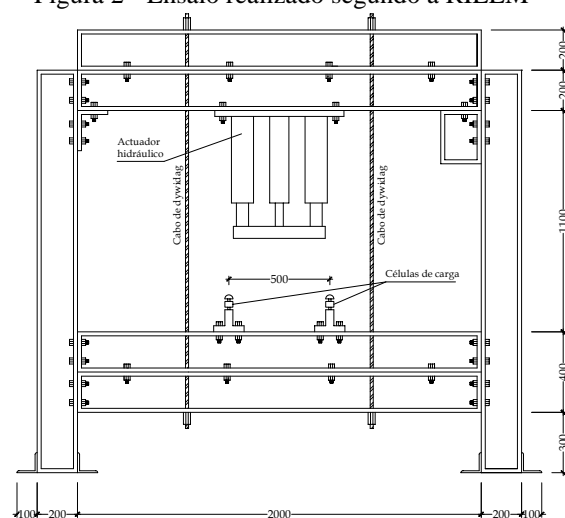
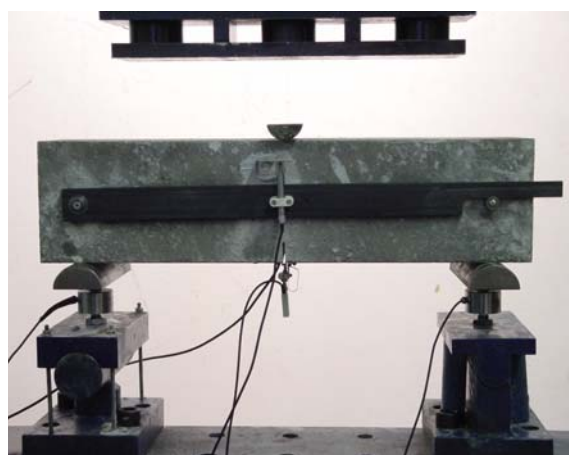
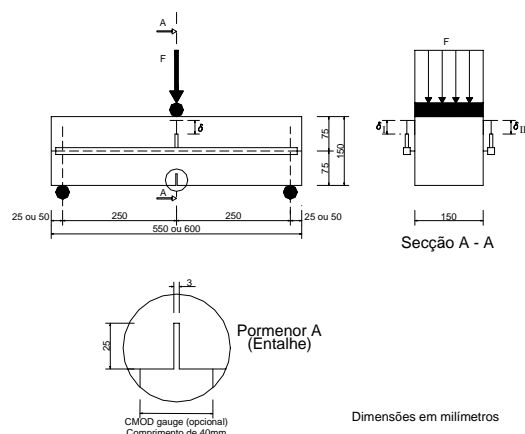
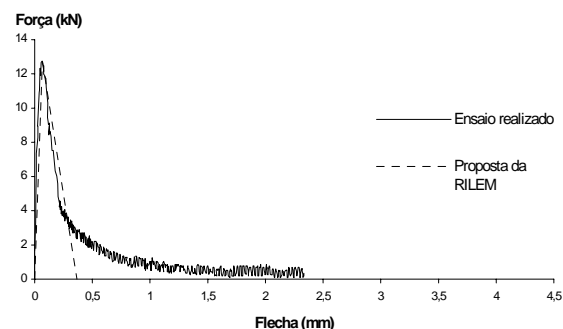


Figura 4 - Relações típicas força-flecha

A contribuição do betão simples D_{BZ}^b no modelo proposto pela RILEM é traduzida, em termos gráficos, pelo triângulo isósceles da Figura 4c, com $0.3 + \delta_{Fu}$ [mm] de base e F_u [N] de altura. Esta contribuição foi validada com os ensaios realizados (ver Figura 5), embora peque por conservadora.



3 - COMPOSIÇÕES, FABRICO E CURA

3.1 - Características dos materiais

Agregados

No fabrico dos BRFA foram utilizados, para agregados grossos, dois tipos de brita granítica, e para agregados finos, uma areia granítica britada e uma areia fina de rio. A escolha dos agregados foi feita com base numa análise dos materiais disponíveis na região do Minho, tendo igualmente em conta que as preocupações de ordem ambiental apontam para que as areias provenientes de extracções em dunas ou leitos de rios sejam, a breve trecho, substancialmente restringidas. Neste sentido, optou-se por utilizar uma areia britada que, no entanto, e devido à forma irregular das suas partículas, prejudica a trabalhabilidade da mistura. Sendo esta característica fundamental, sob pena de insucesso na colocação em obra do material compósito e, tendo igualmente em atenção que, a baixa quantidade de ligante empregue e a incorporação de fibras metálicas também diminuem a trabalhabilidade pretendida, optou-se por utilizar quatro tipos de agregados, de forma a conseguir um melhor ajuste à curva de referência, empregue na formulação das composições.

Cimento

O cimento escolhido (Portland, Tipo I, classe 42.5 R) sendo aproximadamente 20% mais dispendioso que o cimento da classe 32.5, apresenta reacções mais rápidas, proporcionando um aumento de resistência mais acentuado para idades mais jovens do BRFA, ajudando a contrariar o efeito das cinzas volantes, em termos de resistência.

Água

Foi utilizada água da rede pública.

Cinzas Volantes

O tamanho reduzido das partículas das cinzas volantes, com a consequente elevada superfície específica, exigiria uma maior quantidade de água. Tal não ocorre devido ao efeito “lubrificante” da forma esférica

destas partículas. Por outro lado, as CV possibilitam uma melhoria da compacidade da pasta, na medida em que vão preencher o espaço mais à esquerda da curva granulométrica (Efeito de Filler). Em idades mais avançadas, a sua lenta combinação com o hidróxido de cálcio, proveniente da reacção de hidratação do cimento, conduz à formação de compostos com propriedades aglomerantes (Efeito Pozolânico).

Dada a grande quantidade de cinzas produzidas em Portugal e da sua ainda reduzida aplicação no fabrico de betões, estas apresentam um preço atractivo, embora evidenciem uma variabilidade considerável das suas características, nomeadamente no tocante ao teor de inqueimados. As cinzas utilizadas, provenientes da central do Pego, apresentam valores de perda ao fogo entre 5.5 e 9.9%, o que face às recomendações da NP EN450 [1995], impediria a sua aplicação no fabrico de betões. No entanto, estudos realizados [Aires *et al.* 1998] revelaram que a aplicação deste tipo de cinzas permitiu alcançar níveis de desempenho similares aos obtidos com cinzas satisfazendo os requisitos da referida Norma.

Na investigação desenvolvida foram estudadas composições com 0%, 12.5% e 25% de substituição de cimento por CV.

Superplastificante

No presente trabalho utilizou-se um superplastificante, SP, com a designação comercial RHEOBUILD® 1000, de forma a assegurar a trabalhabilidade pretendida com a menor relação A/C*, tendo-se empregue uma dosagem de 2.5% da massa do ligante. Esta dosagem corresponde a 1% da massa do ligante se se tiver em conta apenas as partículas sólidas do SP.

Fibras metálicas

Para este estudo foram utilizadas fibras com a designação comercial DRAMIX® RC-80/60-BN [Dramix 1998]. Nesta referência o valor 60 corresponde ao comprimento da fibra ($l_f = 60$ mm) e o valor 80 à sua esbelteza (l_f/d_f), em que d_f é o

diâmetro da fibra. A tensão de cedência do aço destas fibras é de aproximadamente 1100 MPa.

Nas aplicações em pavimentos de edifícios industriais a quantidade de fibras, genericamente empregue, encontra-se no intervalo de 10 a 30 kg/m³. Por este facto, as composições estudadas foram reforçadas com 0, 10, 20 e 30 kg/m³.

3.2 - Metodologia de formulação das composições

Utilizando a fórmula proposta por Faury [Coutinho, 1988] calculou-se a compacidade (*I*) da mistura, tendo em conta o objectivo de conseguir um Slump ≥ 15 cm, que se enquadra no limite superior da classe de consistência S3, tal como está definido na Norma NP ENV 206 (S3 ⇒ 10 < Slump ≤ 15 cm):

$$I = \frac{K}{\sqrt[3]{D_{\max}}} + \frac{K'}{\frac{R}{D_{\max} - 0.75}} \quad (3)$$

em que $D_{\max}=25.4$ mm é a máxima dimensão dos agregados, $R=D_{\max}$ é o raio médio do molde, pelo que se admitiu que a penetração do betão se faz sem dificuldades, $K=0.33$, tendo em conta que foi utilizado superplastificante e $K'=0.003$. Substituindo estes valores em (3) resulta $I=185$ l.

Utilizando a norma 613 do ACI, pode-se estimar para volume de vazios, V_v , o valor de 15 l/m³.

Tendo em conta a presença de superplastificante, a quantidade de água é estimada pela expressão:

$$\begin{aligned} A &= I - V_v - V_{sp} \\ &= 185 \text{ l} / \text{m}^3 - 15 \text{ l} / \text{m}^3 - \frac{2.5\% \times 300 \text{ kg} / \text{m}^3}{1.2 \text{ kg} / \text{l}} \\ &= 163.75 \text{ l} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

pelo que

$$\frac{A^*}{C^*} = \frac{A + V_{sp}}{C^*} = \frac{163.75 + 6.25}{300} = 0.57$$

Atendendo a que a substituição de cimento por cinzas, pelas razões anteriormente

apontadas, conduz, em princípio, a um aumento de trabalhabilidade, optou-se por reduzir a razão A^*/C^* nas composições com adições activas da seguinte forma:

- $CV=0\% \Rightarrow A^*/C^*=0.57$;
- $CV=12.5\% \Rightarrow A^*/C^*=0.55$;
- $CV=25\% \Rightarrow A^*/C^*=0.53$.

Esta medida não só se revelou eficaz no sentido em que permitiu a obtenção de uma trabalhabilidade semelhante em todas as composições, como também levou a uma diminuição do efeito retardador da evolução da resistência com o aumento da percentagem de CV.

De entre os métodos existentes para definir a composição dos agregados na mistura, optou-se pelo método de Faury. Aos parâmetros A e B da curva de Faury atribuíram-se os valores 38 e 2, respectivamente, em consonância com as recomendações de Coutinho [1988]. Este procedimento foi repetido para as três percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes ($CV / (C+CV) = 0\%, 12.5\%$ e 25%).

Desta forma determinaram-se as quantidades dos diversos componentes para cada uma das amassaduras experimentais, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Composições típicas dos BRFA produzidos

Componente		Kg/m³		
Cimento I 42.5R		300	262.5	225
Cinzas Volantes	Q _{cv}	0	37.5	75
	Q _{cv} (%) - i	(0)	(12.5)	(25)
Areia Fina		173.5	165.5	152.3
Areia britada		871.0	875.5	869.1
Brita 5/15		315.7	319.1	319.1
Brita 15/25		468.2	470.6	467
Água		163.8	158.8	153.8
Rheobuild® 1000		7.5		
Fibras Dramix®	Q _f - j	0-10-20-30		
	V _f (%)	(0)-(0.12)-(0.25)-(0.38)		
Designação		BF/CVi-80/60		

3.3 - Amassadura e preparação dos provetes

A metodologia adoptada para a preparação das amassaduras foi a seguinte:

1. humedecimento da misturadora;
2. introdução da brita 15/25;
3. introdução da brita 5/15;
4. introdução da areia grossa;

5. introdução da areia fina;
6. mistura (1 minuto);
7. determinação do teor de humidade dos agregados;
8. introdução de cimento;
9. introdução das CV;
10. mistura (1 minuto);
11. introdução de 2/3 da quantidade total da água;
12. mistura (2 minutos);
13. introdução do Superplastificante mais 1/3 da água;
14. mistura (2 minutos);
15. introdução das fibras;
16. mistura (2 minutos).

As amassaduras assim obtidas, foram posteriormente submetidas a ensaios de trabalhabilidade, *Cone de Abrahams* (efectuado antes e depois da incorporação das fibras), *Cone invertido* e *Vebe*. Estes ensaios foram executados de acordo com os procedimentos descritos nas normas. Posteriormente, e para cada amassadura, foram preparados nove cubos de 15 cm de aresta e nove vigas com 15x15x60 cm³, de acordo com a seguinte metodologia:

1. introdução da mistura no molde por forma a encher cerca de 1/2 deste [RILEM 2000a];
2. compactação com recurso a uma mesa vibratória, durante 20 s;
3. enchimento do molde com uma nova porção de mistura [RILEM 2000a];
4. compactação com recurso a uma mesa vibratória, durante 20 s;
5. extracção do excesso da mistura e nivelamento;
6. colocação em câmara húmida (H.R. ≥ 95%; T=20°C);
7. desmoldagem dos provetes entre 24 e 48 horas após a betonagem;
8. conservação dos provetes em água até à realização dos ensaios.

Os provetes foram posteriormente ensaiados à flexão e à compressão em séries de três provetes nas idades de 7, 28 e 90 dias.

4 - EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Na Figura 3 representa-se a estrutura de reacção utilizada nos ensaios de flexão. Trata-se de uma estrutura porticada constituída por perfis HEB200. Próximo das extremidades do provete foram dispostas barras dywidag de 15 mm de diâmetro, a ligar as travessas do pórtico, de forma a aumentar a rigidez deste.

A deformabilidade do provete foi avaliada por intermédio de dois LVDT's de 5 mm de campo, com precisão de 0.05% e 0.16% do campo de leitura, fixos a barras colocadas nas faces laterais do provete. Estas barras apoiam-se em dois pontos fixos do provete, de forma a não serem registados deslocamentos parasitas (ver Figuras 1 e 2). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento, à velocidade de deformação de 0.2 mm/min, em consonância com a recomendação da RILEM [2000a], tendo o controlo sido efectuado pelo transdutor de deslocamento de maior precisão. A 8 mm da face inferior foi colocado um clip-gauge com campo de leitura de 5 mm e precisão de 0.05% sobre aquele valor, de forma a estimar a “abertura de fenda” (ver Figura 6). Para avaliar a força aplicada foram colocados sob a viga, nos seus pontos de suporte, dois transdutores de força de 50 kN de capacidade máxima de carga e 0.5% de precisão.

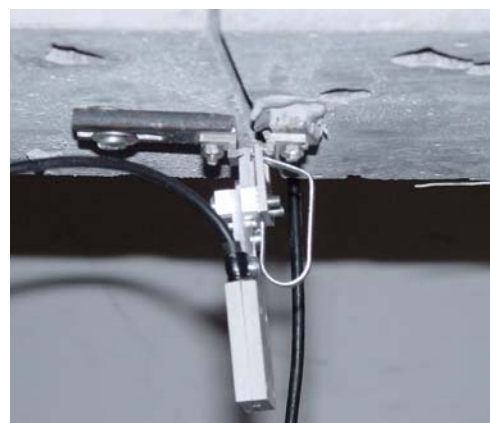


Figura 6 - Colocação do clip-gauge

Admitindo que os procedimentos de ensaio utilizados conduzem a uma rotura do provete por flexão simples, os valores registados pelo transdutor de controlo, δ_l , e pelo transdutor, δ_H , deveriam ser

semelhantes. Contudo, verificaram-se diferenças não desprezáveis em alguns provetes, devido à distribuição heterogênea de fibras na secção de fractura. A título de exemplo apresenta-se na Figura 7 a relação entre os valores de δ_I e δ_{II} , onde se verifica, claramente, que o transdutor que regista δ_{II} sofreu um maior deslocamento durante o ensaio. Ao analisar a superfície de fractura em ambas as faces verticais do provete (ver Figura 8), é visível uma maior progressão da fissura correspondente ao δ_{II} . Este facto não será alheio à maior concentração de fibras junto à face que registou menor deslocamento, δ_I , conforme é visível na Figura 9. Daqui se conclui que a distribuição heterogênea de fibras poderá introduzir uma componente de flexão, não contabilizada no modelo de cálculo da RILEM.

Da comparação entre os valores da flecha e da abertura de fenda, ilustrada no gráfico da Figura 10, verifica-se uma relação aproximadamente linear.

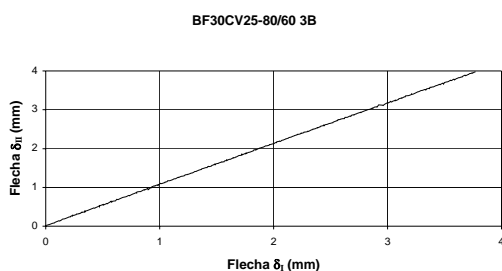


Figura 7 - Relação entre δ_I e δ_{II}

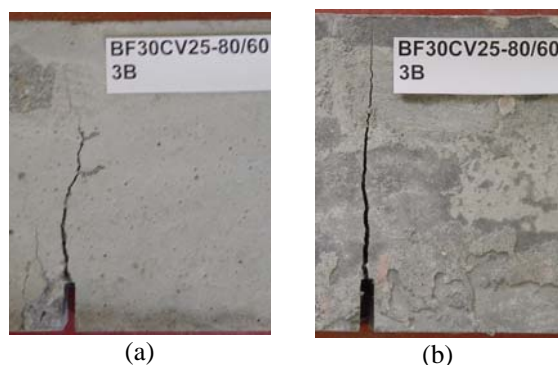


Figura 8 - Progressão da fenda em ambas as faces do provete após ensaio de flexão - (a) face contrária à de betonagem (δ_I); (b) face de betonagem (δ_{II})



Figura 9 - Secção do provete

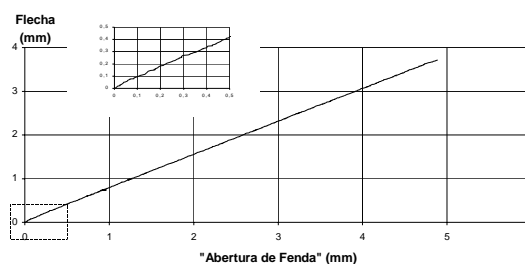


Figura 10 - Relação flecha vs “abertura de fenda”

5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - Introdução

A campanha de ensaios em curso consiste na realização de 108 ensaios de flexão e 108 ensaios de compressão, tendo-se avaliado a influência da percentagem de fibras, da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes e da idade do compósito na resistência à compressão e no comportamento à flexão. Neste último, deu-se especial atenção às resistências equivalentes em flexão ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$), dado serem parâmetros utilizados na simulação do comportamento à tracção do BRFA fendilhado, nas verificações aos estados limites de utilização e últimos [RILEM 2000b]. Nas secções seguintes analisam-se os resultados obtidos para $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ apresentando-se os valores da resistência à compressão obtidos nas correspondentes amassaduras.

5.2 - Influência da quantidade de fibras e da adição de cinzas aos 7 dias na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$

No Quadro 2 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão em

cubos, f_{cm} , e o respectivo desvio padrão, s_p , obtidos aos 7 dias (média de três valores). Os valores médios de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, a esta idade, estão indicados no Quadro 3 e representados no gráfico da Figura 14. Da análise destes elementos constata-se que:

- existe claramente um aumento da resistência equivalente em flexão, com o incremento da quantidade de fibras, resistência essa que, para um mesmo volume de fibras, diminui com o incremento da quantidade de cinzas volantes;
- como seria de esperar, o BRFA sem adição de cinzas evidencia, em idades jovens (7 dias), um melhor desempenho, efeito este que se revela mais notoriamente para quantidades de fibras superiores a 10 kg/m^3 ;
- a $f_{eq,3}$ é genericamente superior à correspondente $f_{eq,2}$ revelando um comportamento dúctil, exceção feita ao betão sem fibras, onde a redução brusca da carga com o aumento da flecha, na fase de amolecimento do material (comportamento frágil), penaliza mais fortemente a $f_{eq,3}$ (ver Figuras 11, 12 e 13).

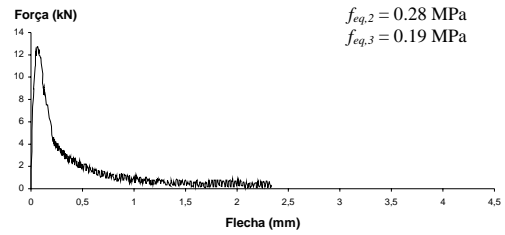


Figura 11 - Relação carga vs flecha para provete de betão sem fibras

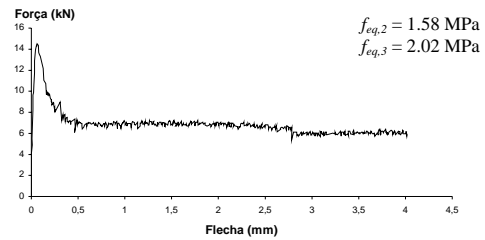


Figura 12 - Relação carga vs flecha para provete reforçado com 10 kg/m^3 de fibras

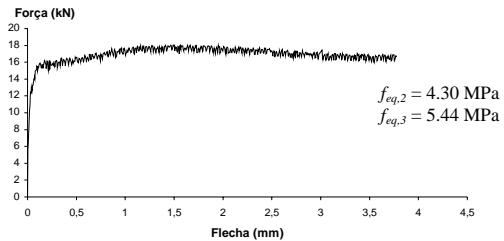


Figura 13 - Relação carga vs flecha para provete reforçado com 30 kg/m^3 de fibras

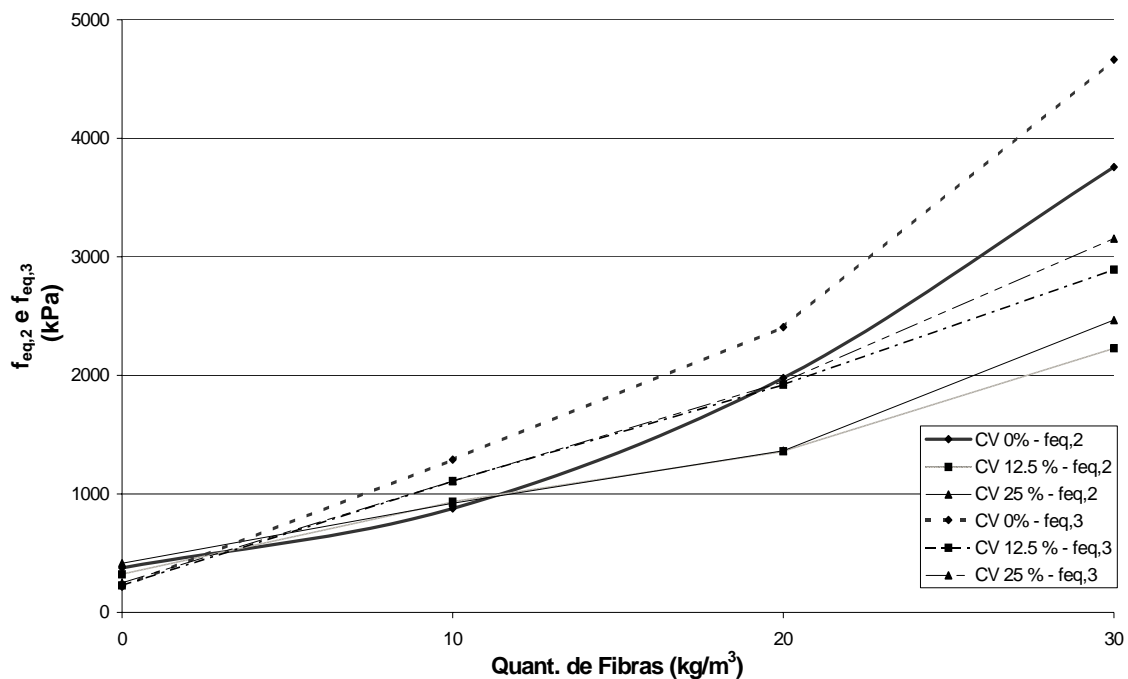


Figura 14 - Influência da quantidade de fibras e de cinzas volantes na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - Idade 7 dias

Quadro 2 - Resistência à compressão aos 7 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)			
		0	10	20	30
f_{cm} (MPa)	0	34,79	39,14	38,46*	33,14
s_p (MPa)		4,20	2,59	2,91*	0,58
f_{cm} (MPa)	12,5	30,13	29,39	35,97	25,05
s_p (MPa)		0,94	3,44	1,09	0,98
f_{cm} (MPa)	25	28,85	28,50	28,97	19,69
s_p (MPa)		2,84	0,34	0,23	0,46

*valor médio/desvio padrão de 2 valores

Quadro 3 - Valores da $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ aos 7 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)							
		0	10	20	30	0	10	20	30
		$f_{eq,2}$				$f_{eq,3}$			
$f_{eq,m}$ (kPa)	0	377	877	1768*	3758	217	1288	2325*	4664
s_p (kPa)		61	179	297*	492	66	246	114*	720
$f_{eq,m}$ (kPa)	12,5	321	934	1360	2229	227	1107	1922	2892
s_p (kPa)		115	29	259	394	68	89	361	536
$f_{eq,m}$ (kPa)	25	416	922	1363	2466*	250	1108	1946	3155*
s_p (kPa)		84	275	485	406*	44	207	546	571*

*valor médio/desvio padrão de 2 valores

5.2 - Influência da quantidade de fibras e da adição de cinzas aos 28 dias na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$

Nos Quadros 4 e 5 apresentam-se os valores da resistência à compressão e os valores de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, respectivamente, registados aos 28 dias. Da análise dos resultados obtidos ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$), representados na Figura 15, constata-se que:

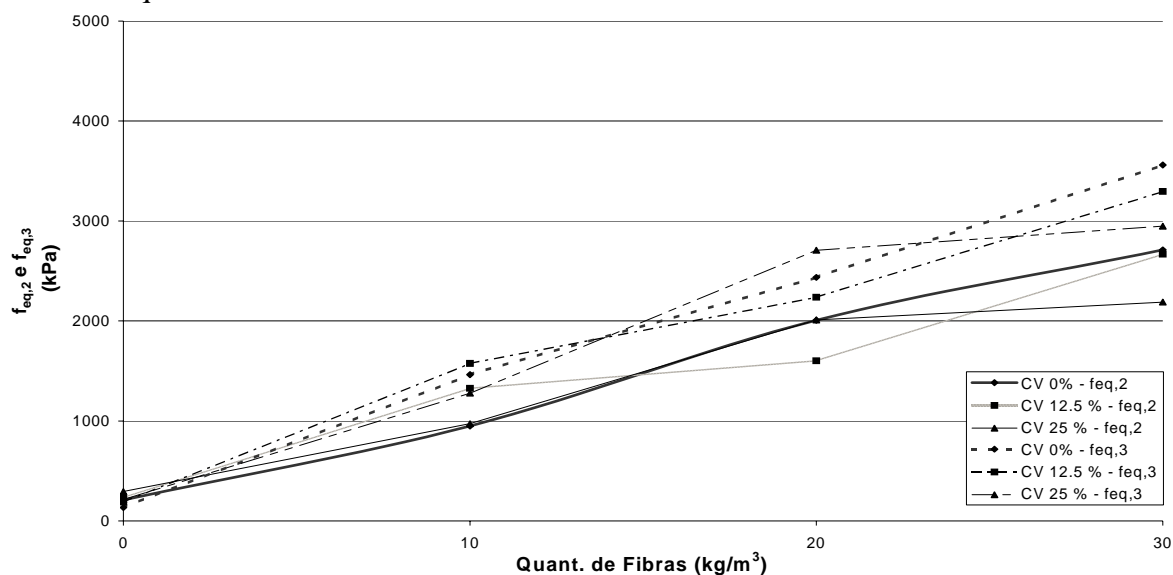


Figura 15 - Influência da quantidade de fibras e de cinzas volantes na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - Idade 28 dias

- ocorre um aumento da resistência equivalente em flexão com o incremento da quantidade de fibras, mas este aumento não é tão significativo como o observado aos 7 dias;
- regista-se uma aproximação dos valores das tensões equivalentes para as amassaduras com e sem cinzas, mantendo-se, no entanto, uma tendência de maior resistência equivalente em flexão nos BRFA sem cinzas volantes;
- a $f_{eq,3}$ mantém-se tendencialmente superior à $f_{eq,2}$. Os valores destas grandezas aproximam-se com a diminuição da quantidade de fibras, pelas razões anteriormente apontadas;
- verifica-se que o incremento da resistência equivalente segue uma tendência de crescimento aproximadamente linear, com o aumento da quantidade de fibras.

Quadro 4 - Resistência à compressão aos 28 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)			
		0	10	20	30
f_{cm} (MPa)	0	37,86	44,98	42,41	33,50
s_p (MPa)		5,15	4,63	11,66	4,95
f_{cm} (MPa)	12,5	43,18	42,00	43,98	27,95
s_p (MPa)		5,23	2,83	1,04	1,37
f_{cm} (MPa)	25	35,07	38,25	39,06	26,82
s_p (MPa)		1,97	2,39	1,03	0,34

Quadro 5 - Valores da $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ aos 28 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)							
		0	10	20	30	0	10	20	30
		$f_{eq,2}$				$f_{eq,3}$			
$f_{eq,m}$ (kPa)	0	210*	950*	2007	2711	133*	1463*	2435	3561
s_p (kPa)		93*	888*	670	468	79*	781*	598	604
$f_{eq,m}$ (kPa)	12,5	234*	1327	1601	2667	188*	1575	2238	3295
s_p (kPa)		183*	128	372	471	32*	200	418	511
$f_{eq,m}$ (kPa)	25	294*	972	2010	2190	214*	1278	2707	2948
s_p (kPa)		2*	541	296	629	38*	479	342	718

*valor médio/desvio padrão de 2 valores

Quadro 6 - Resistência à compressão aos 90 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)			
		0	10	20	30
$f_{eq,m}$ (kPa)	0	-	-	46,70	41,10*
s_p (kPa)		-	-	5,03	0,83*
$f_{eq,m}$ (kPa)	12,5	-	46,36	52,39	34,14
s_p (kPa)		-	2,70	2,00	1,85
$f_{eq,m}$ (kPa)	25	-	-	49,20**	42,59
s_p (kPa)		-	-	2,99**	3,07

*valor médio/desvio padrão de 2 valores

**valor médio/desvio padrão de 4 valores

5.3 - Influência da quantidade de fibras e da adição de cinzas aos 90 dias na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$

Nos Quadros 6 e 7 apresentam-se os valores da resistência à compressão e os valores de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, respectivamente, registados aos 90 dias. Da análise dos resultados das resistências equivalentes disponíveis à data do presente trabalho (ver Figura 16), observa-se que:

- a $f_{eq,3}$ mantém-se superior à correspondente $f_{eq,2}$;
- os valores das tensões em análise nos betões com adição de cinzas suplantaram os valores dos correspondentes betões sem cinzas, registando-se que o melhor desempenho foi conseguido com a substituição de 12.5% de cimento por cinzas.

Quadro 7 - Valores da $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ aos 90 dias

	Cinzas (%)	Fibras DRAMIX® 80/60BN (kg/m³)							
		0	10	20	30	0	10	20	30
		$f_{eq,2}$				$f_{eq,3}$			
$f_{eq,m}$ (kPa)	0	-	-	1714	2104	-	-	2157	2766
s_p (kPa)		-	-	948	550	-	-	919	753
$f_{eq,m}$ (kPa)	12,5	-	955	2696*	3102	-	1365	3300*	4008
s_p (kPa)		-	760	1604*	421	-	546	1898*	840
$f_{eq,m}$ (kPa)	25	-	-	1744	2542	-	-	2797	3294
s_p (kPa)		-	-	82	613	-	-	572	673

*valor médio/desvio padrão de 2 valores

5.4 - Influência da idade na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$

Na Figura 20 representa-se a evolução de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ com a idade e quantidade de fibras dos provetes ensaiados, com CV=0%.

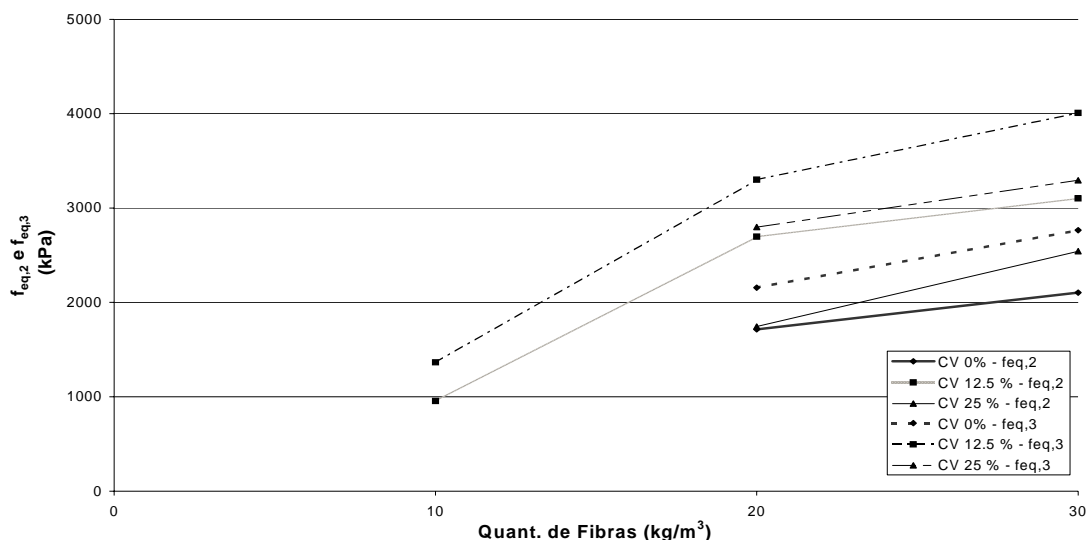


Figura 16 - Influência da quantidade de fibras e de cinzas volantes na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - Idade 90 dias

Da análise desta figura constata-se que:

- não se verifica uma variação considerável de resistência entre os 28 e os 90 dias, como aliás era previsível;
- os valores das tensões registadas aos 7 dias para 30 kg/m³ de fibras são anormalmente elevados, cuja causa se atribuiu à elevada concentração de fibras acima do entalhe. Nas Figuras 17, 18 e 19 representa-se a distribuição das fibras na secção de fractura (acima do entalhe), por intermédio de um campo escalar de cinzas. A secção de fractura foi discretizada em células e a cada célula corresponde um tom de cinza em consonância com o número de fibras existentes nessa célula. Com base nos dados disponíveis à data do presente trabalho [Yining e Barros 2001], verificou-se um maior número de fibras na secção de rotura de um dos provetes ensaiados aos 7 dias, quando comparado com os ensaiados aos 28 dias. Também foi registada uma maior concentração dessas mesmas fibras na zona traccionada (ver Figuras 17, 18 e 19).

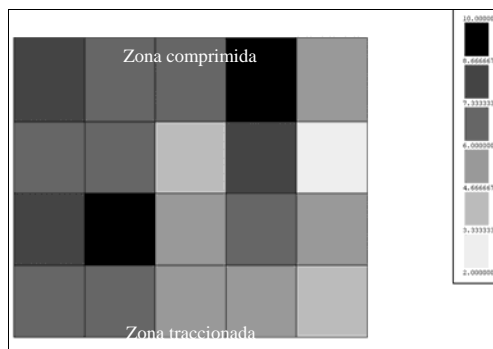


Figura 17 - Distribuição das fibras (total de 124) na secção de rotura (proвете BF30Cv0-80/60 3A - 7 dias)

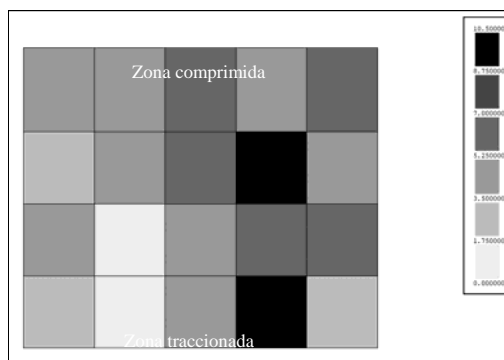


Figura 18 - Distribuição das fibras (total de 97) na secção de rotura (proвете BF30Cv0-80/60 1A - 28 dias)

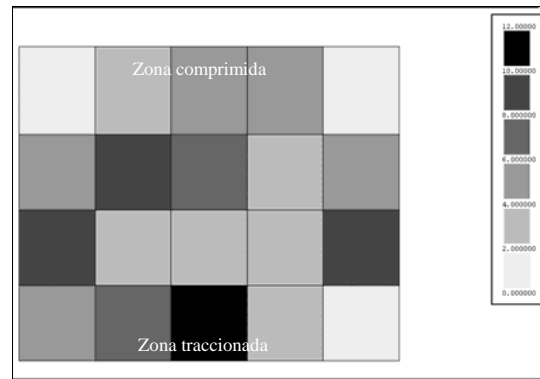


Figura 19 - Distribuição das fibras (total de 94) na secção de rotura (proвете BF30Cv0-80/60 2A - 28 dias)

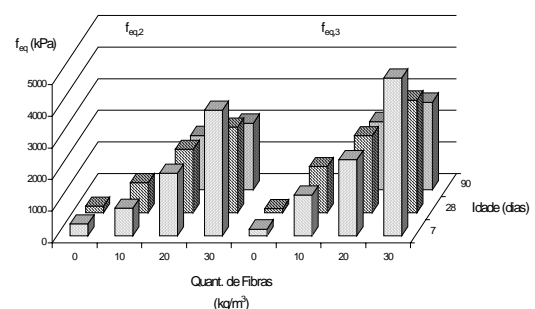


Figura 20 - Influência da idade na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - CV = 0%

Na Figura 21 representa-se a evolução de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ com a idade e quantidade de fibras dos provetes ensaiados, com CV=12.5%. Da análise deste gráfico constata-se que:

- é notório o aumento da resistência com a idade para as quantidades de fibras de 20 e 30 kg/m³;
- para quantidades de fibras inferiores a 10 kg/m³ esse aumento de resistência não é tão evidente.

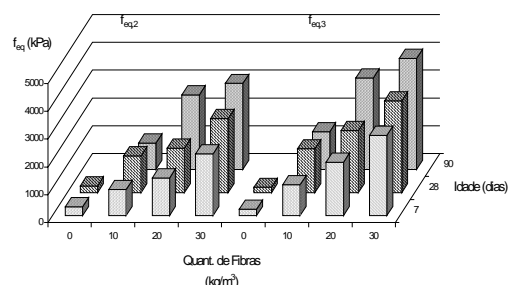


Figura 21- Influência da idade na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - CV = 12.5%

Por sua vez o gráfico da Figura 22 (CV=25 %), permite depreender que:

- não é tão significativo o aumento de resistência entre os 28 e os 90 dias, relativamente ao verificado no caso anterior;
- o aumento da resistência com a idade é mais regular na $f_{eq,3}$.

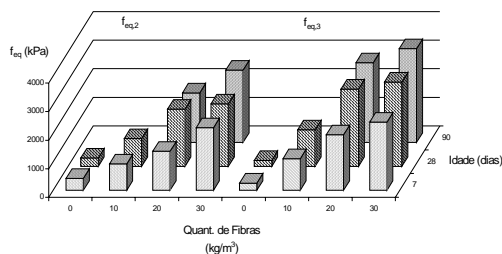


Figura 22 - Influência da idade na $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - CV = 25%

6 - CONCLUSÕES

Um dos aspectos relevantes que se retira deste trabalho é de que não existe uma correlação directa entre os valores das tensões equivalentes em flexão, f_{eq} , e os correspondentes valores da resistência à compressão, pelo que, se conclui que a qualidade da matriz, embora fundamental, não constitui uma garantia do bom comportamento em flexão do compósito, uma vez que, o número, a distribuição e a orientação das fibras na secção de fractura, assumem aqui um papel primordial. Verifica-se que a resistência à compressão é marginalmente afectada pela participação das fibras, enquanto as f_{eq} aumentam significativamente com a quantidade de fibras, Q_f .

Dada a considerável dispersão de resultados verificada, será aconselhável que os valores médios e característicos das f_{eq} sejam obtidos a partir de um número de provetes superior ao utilizado neste trabalho, por forma a melhorar a fiabilidade dos resultados obtidos. Aconselha-se seis provetes por amassadura.

Relativamente às vantagens da adição de CV à mistura, para além do aspecto económico, é de notar que a área da matriz em contacto com as fibras é

substancialmente superior à que se verificaria se se utilizasse uma percentagem igual de reforço constituída por varões, pelo que, a microestrutura do betão assume maior relevância. Deste modo, o *efeito de filler* proporcionado pelas CV, traz benefícios acrescidos ao comportamento do compósito, havendo no entanto necessidade de ter atenção, à evolução das resistências em idades jovens.

Em termos gerais, as f_{eq} aumentaram com a percentagem de fibras, para todas as idades. Os casos em que tal não ocorreu estão relacionados com uma deficiente distribuição das fibras na secção de fractura (menor número de fibras na zona traccionada). O aumento das f_{eq} com Q_f é mais significativo nas idades jovens.

Até aos 28 dias de idade as composições sem cinzas volantes, CV, apresentaram maiores resistências equivalentes em flexão que as correspondentes composições com CV. Todavia, aos 90 dias verificou-se que a composição com 12.5% de substituição de cimento por CV conduziu aos maiores valores das f_{eq} , revelando que, se numa estrutura as sobrecargas poderem ser aplicadas quando os BRFA tiverem idades superiores a 90 dias, a utilização moderada de CV conduz a betões de maior desempenho e mais económicos.

Em termos gerais verificou-se que para $10\text{kg/m}^3 \leq Q_f \leq 30\text{kg/m}^3$, $f_{eq,3}$ é superior a $f_{eq,2}$, indicando que a tensão que simula o comportamento do BRFA fendilhado, nas verificações aos estados limites últimos, é maior que a tensão usada na verificação aos estados limites de utilização.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem o financiamento prestado pelo programa POCTI, “POCTI/34793/99 - Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements”, FCT, e às empresas que gentilmente forneceram os

materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente, à Bekaert / Bui Internacional, à Bettor MBT Portugal, à Central de Betão Pronto de Moreira de Cónegos, à Central Termo-Eléctrica do Pego, à Pisonort - Pavimentos Industriais SA, e à SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, SA.

7 - BIBLIOGRAFIA

- ACI 613, Recommended practice for selecting proportions for concrete, ACI Standard 613.
- ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI, 1997.
- Balaguru, P.N.; Shah, S.P., Fiber reinforced cement composites, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1992.
- Barros, J.A.O., Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica, Tese de Doutoramento, Faculdade de Eng. da Univ. do Porto, 1995.
- Barros, J.A.O.; Amorim, J.A.S.B.A.; Antunes, J.A.B., Caracterização do betão reforçado com fibras segundo a proposta da RILEM, Seminário Betão reforçado com fibras de aço – recentes desenvolvimentos nas áreas da caracterização experimental, cálculo e aplicação. Dimensionamento e execução de pavimentos, Capítulo 2, LNEC, Junho 2001.
- Camões, A. et al., “Caracterização mecânica de betões de elevado desempenho com cinzas volantes”, JPÉE98, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, p. 517-525, 1998.
- Coutinho, A.S., Fabrico e propriedades do betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2 volumes, 1988.
- Dramix, Product data sheet, N.V.Bekaert S.A., 1998.
- NP EN450 1995, Cinzas volantes para betão, definições, exigências e controlo da qualidade, Instituto Português da Qualidade, Fevereiro 1996.
- NP ENV 206 1993, Betão – Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade, Outubro 1993.
- Olesen, J. F., Fictitious crack propagation in fiber-reinforced concrete beams, Journal of Engineering Mechanics (March) 272-280.
- RILEM TC 162 – TDF, Materials and Structures, Vol. 33, pp 3-5 January-February 2000a.
- RILEM TC 162 – TDF, Materials and Structures, Vol. 33, pp 75-81, March 2000b.
- Steel fibre reinforced industrial floor design in accordance with the Concrete Society TR34, Technical Publication of N.V.Bekaert S.A., 44 pp, 1997.
- Yining, D.; Barros, J.A.O., “Assessing indirectly the influence of the fibre length and fibre orientation on the equivalent flexural strength of SFRC”, Report 01-DEC/E-11 (a publicar em Novembro de 2001).